

---

This is the **published version** of the bachelor thesis:

Herreiz Abad, Javier; Martí Godia, Enric, dir. Simulador de cossos celestes en Realitat Virtual. 2021. (958 Enginyeria Informàtica)

---

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/238420>

under the terms of the  license

# Simulador de cossos celestes en realitat virtual

Javier Herreiz Abad

**Resum-** Aquest projecte consisteix en la creació, disseny i desenvolupament d'un simulador de cossos celestes amb un cert grau de realisme físic en un entorn immersiu de Realitat Virtual. La simulació inclou la vista en detall d'una galàxia i d'un forat negre sense rotació, a més d'una vista 360 graus des de la terra en la que es poden seleccionar altres cossos celestes sense entrar-hi en detall. La implementació s'ha fet en Unity i amb l'equipament de realitat virtual HTC Vive.

**Paraules clau-** Galàxia, Forat negre, Cos Celeste, Unity, Realitat Virtual, Shader, Camp de Visió, Lents Gravitacionals, Disc D'acreció, HTC Vive.

**Abstract-** This project is about the creation, design and development of a celestial body simulator with a certain degree of physic realism in a Virtual Reality environment. The simulation includes the detailed view of a galaxy and a non-rotating black hole, plus a 360-degree view from the Earth point of view, where we can look at some other celestial bodies with a lot less detail. The project was implemented with Unity and the HTC Vive VR equipment.

**Keywords-** Galaxy, Black Hole, Celestial Body, Unity, Virtual Reality, Shader, Field of View, Gravitational Lenses, Accretion Disc, HTC Vive.

---



---

## 1 INTRODUCCIÓ

Sempre m'ha emocionat l'univers, i he llegit molt sobre el tema. Especialment sempre m'han cridat l'atenció els forats negres, que encara avui dia són un gran misteri del que se sap molt poc a nivell pràctic. Per això, quan a l'assignatura de Visualització gràfica interactiva vaig desenvolupar un simulador del sistema solar, em va venir al cap aquesta idea. L'Enric Martí va donar la idea de fer-ho immersiu, en realitat virtual, cosa que em va semblar molt bé. La finalitat d'aquest projecte és divulgativa: donar a conèixer l'univers de forma visual però amb dades reals.

L'eina que he escollit es Unity [1] per dues raons. En primer lloc perquè es un motor de videojocs molt complet i, entre altres coses, permet treballar en realitat virtual. A més jo ja havia treballat amb Unity, cosa que em permet no haver de perdre temps aprenent les coses

més bàsiques. Per últim, Unity te una comunitat molt gran i disposa de molta documentació.

### 1.1 Estat de l'art

De simuladors de l'espai, destaquem "Spaceengine"[3] que és un dels més complets i ambiciosos. Spaceengine es un simulador que intenta mostrar tot l'univers que coneixem de forma realista. Amb Spaceengine podem visualitzar tot tipus de cossos celestes en detall i variar paràmetres com el pas del temps.

També trobem projectes més senzills, per exemple un simulador més senzill anomenat "100000 Stars" [2] que mostra grups d'estrelles a la via làctia, una aplicació independent, desenvolupada per un petit equip d'entusiastes de l'espai.

O projectes més complexos; per la pel·lícula "Interstellar" [4], amb tots els mitjans d'una

- E-mail de contacte: [jherreiz20@gmail.com](mailto:jherreiz20@gmail.com)
- Treball tutoritzat per Enric Martí I Jorge Carretero
- Curs 2020/21

superproducció de Hollywood, es va fer la simulació més potent i realista d'un forat negre que s'ha fet mai. Aquesta simulació va comptar amb el físic teòric Kip Thorne com assessor científic i fins i tot s'hi van publicar alguns papers científics.

## 1.2 Objectius del projecte

El principal objectiu del projecte és el disseny, implementació i test d'un simulador de cossos celestes amb l'objectiu principal de poder visualitzar de forma immersiva alguns dels misteris de l'univers com poden ser els forats negres. Funcionalitats o objectius més concretes:

- Vista skybox inicial (cel estrellat en 360 des del punt de vista terrestre).
- Vista 3d d'una galàxia
- Vista 3d d'un forat negre (primer més simple, després s'implementaran característiques com les lents gravitacionals).
- Visualització en Realitat Virtual amb interacció d'usuari simple i interfície lleugera per maximitzar la immersió.

L'eina de desenvolupament que utilitzarem serà Unity and l'equipament de realitat virtual HTC Vive.

Aquest projecte s'ha fet en col·laboració amb el PIC-UAB (punt d'informació científica UAB), amb el Jorge Carretero com a representant del PIC.

## 2 DISSENY GENERAL



Fig 1: Esquema de pantalles.

Els usuaris poden seleccionar els punts (en aquesta versió de l'aplicació només galàxies) als que volen viatjar, per exemple la galàxia d'Andròmeda o la mateixa Via làctia.

Un cop han clicat [Enter] sobre la galàxia a la que volen viatjar s'obre la vista 3D de galàxia, un sistema de partícules que mostra la forma de la galàxia i ens permet moure'ns al voltant, apropar-nos o allunyar-nos. Des d'aquí podem retornar al skybox inicial o viatjar al centre de la galàxia per visualitzar el forat negre.

Un cop han clicat [Enter] sobre el centre de la galàxia es carrega la vista del forat negre, similar a la vista de la galàxia, ens podem moure al voltant de la mateixa manera. També podem modificar la deformació del forat negre, variar el tamany del disc d'acreció i activar o desactivar els fluxos relativistes.

## 2.1 Música

Una música tranquil·la sonant de fons proporciona l'atmosfera ideal pel simulador.

L'autor de la música que sona de fons a l'aplicació, de llicència lliure, és SScheidl, de la plataforma Pixabay. [14]

## 3 DESENVOLUPAMENT SKYBOX

La imatge ha sigut mapejada en 360° mitjançant la utilitat skybox de Unity. Components d'interfaç:

- **Marca d'objectiu:** selecciona la galàxia que volem visualitzar.
- **Flexa de navegació:** Apunta a l'objectiu que tenim seleccionat.
- **Text informatiu:** Nom de la galàxia.



Fig 2: PantallaSkybox al principi del desenvolupament, textura: [5]

\*La imatge final ha sigut proporcionada pel PIC de la UAB.

## 3 DESENVOLUPAMENT VIA LÀCTIA

En aquesta part es farà una simulació de la via làctia (figura 3).

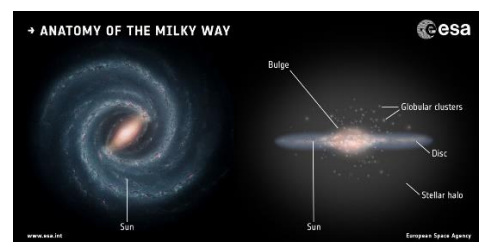


Fig 3: Parts de la Milky Way [5]

Un sistema de partícules consisteix en un conjunt de moltes figures bidimensionals (en aquest cas

cercles) que sempre miren a la càmera, anomenades partícules. Aquestes partícules tenen una sèrie d'atributs: tamany, color, velocitat, velocitat angular, temps de vida, etc. Les partícules es mouen en funció de la seva velocitat vectorial, i quan el seu temps de vida arriba a zero es destrueixen. També hi ha un ratio d'emissió, és a dir, quantes partícules generem per segon. Ajustant aquests paràmetres obtenim infinitat de possibilitats de formes i comportaments pel nostre sistema. Un sistema de partícules arriba a l'estat estacionari quan el patró es repeteix de forma cíclica i les partícules neixen al mateix ritme que moren, el que implica que el nombre de partícules que hi ha al sistema es manté constant.

En aquest cas, per ser més fidel a la realitat, la simulació està pràcticament “congelada” en un punt estacionari del sistema, el que implica que podem veure la forma dels sistemes de partícules, però pràcticament no s'estan movent. La Simulació de la galàxia s'ha fet mitjançant 14 sistemes de partícules per cadascuna de les següents parts:

- **Braç part interior (figura 4):** Una espiral amb molt poca variació de trajectòria a les partícules per mostrar un flux concentrat. Més velocitat angular i, per tant, una espiral més tancada que la part exterior.

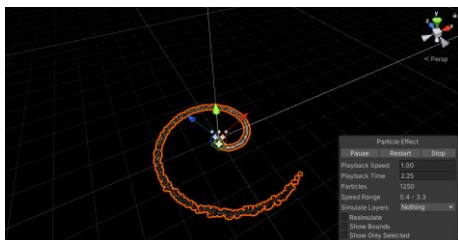


Fig 4: Braç part interior.

- **Braç part interior dispersió (figura 5):** Una espiral amb més partícules i més variació de trajectòria i velocitat que la part concentrada. Per això aquest sistema de partícules compta amb un flux més dispers. Més velocitat angular i, per tant, una espiral més tancada que la part exterior.

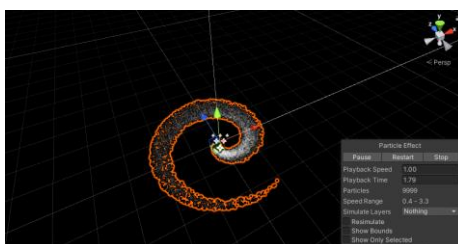


Fig 5: Braç part interior dispersió.

- **Braç part exterior (figura 6):** Una espiral amb molt poca variació de trajectòria a les partícules per mostrar un flux concentrat. Menys velocitat angular i, per tant, una espiral més oberta que la part interior.

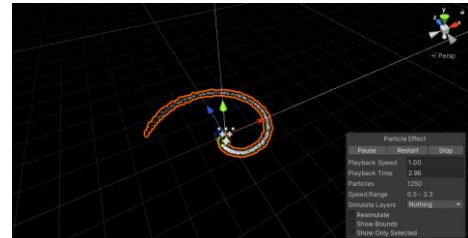


Fig 6: Braç part exterior.

- **Braç part exterior dispersió (figura 7):** Una espiral amb més partícules i més variació de trajectòria i velocitat que la part concentrada, per això aquest sistema de partícules compta amb un flux més dispers. Menys velocitat angular i, per tant, una espiral més oberta que la part interior.

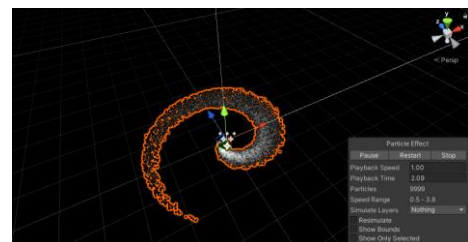


Fig 7: Braç part exterior dispersió.

\*Els 4 sistemes de partícules esmentats fins ara (figures 4, 5, 6 i 7) apareixen dues vegades cadascun, pels dos braços de la Via Làctia.

- **Bulb (figura 8):** Una esfera de partícules deformada aproximadament al 40% a les seves components Y i Z, el que li dona forma “d’ou”.

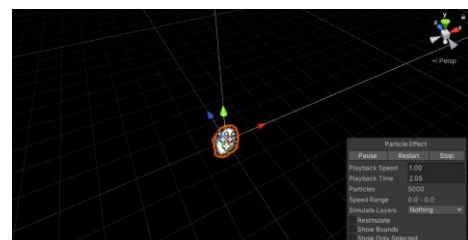


Fig 8: Bulb.

- **Boira localitzada al bulb (figura 9):** Un sistema de partícules de la mateixa forma i el doble de tamany que el bulb però amb

partícules més grans i amb molta transparència que fan efecte de boira.

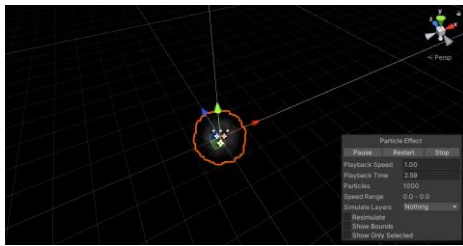


Fig 9: Boira localitzada al bulb.

- **Halo d'estrelles (figura 10):** Partícules distribuïdes en una esfera deformada al 50% en l'eix Y. El que resulta en un esferoide oblat que cobreix tota l'extensió de la galàxia.

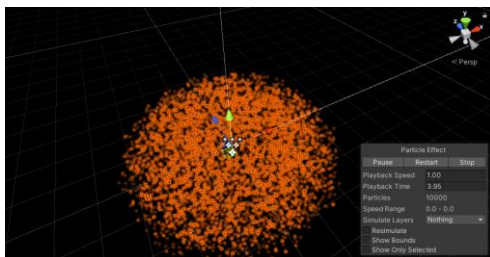


Fig 10: Halo d'estrelles.

- **Cúmuls globulars (figura 11):** Sistema amb la mateixa forma i tamany que l'halo d'estrelles, però amb molt poques partícules molt més grans. Això representa els cúmuls globulars d'estrelles que hi ha al voltant de la nostra galàxia.

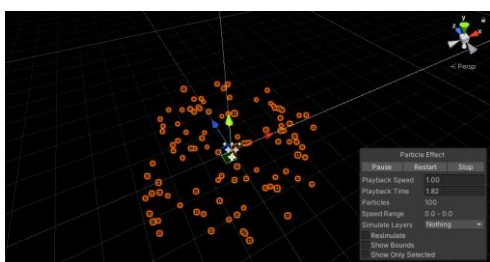


Fig 11: Cúmuls globulars.

- **Concentració d'estrelles al disc (figura 12):** Sistema de partícules en forma de disc, amb una densitat bastant elevada, que cobreix tota l'extensió de la galàxia.

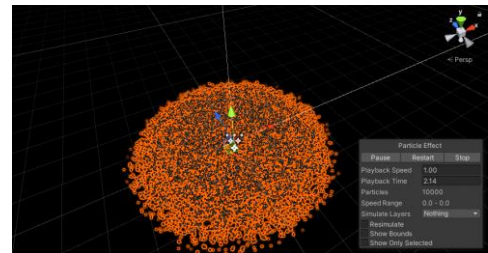


Fig 12: Concentració d'estrelles al disc.

- **Boira al disc (figura 13):** Un sistema de partícules de la mateixa forma i tamany que la concentració al disc però amb partícules més grans i amb molta transparència que fan efecte de boira.

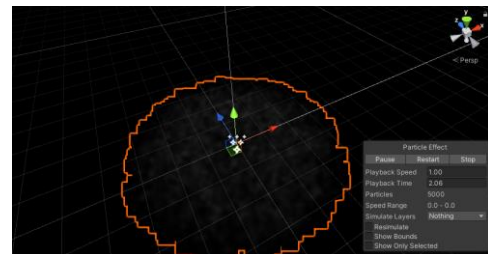


Fig 13: Boira al disc.

### 3.1 Resultat final



Fig 14: Resultat de la via làctia.

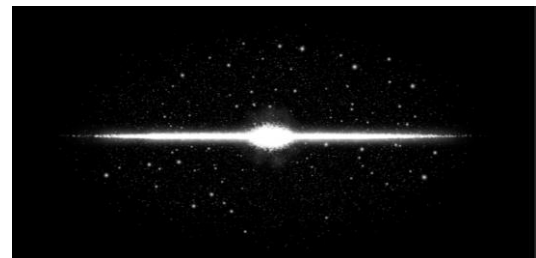


Fig 15: Perfil del resultat.

### 3.2 Comparativa final

Com podem veure a les figures 16 i 17 la simulació ha quedat bastant semblant a la imatge de referència, treient la part de color, que s'ha decidit descartar donada la dificultat de colorejar de forma visualment realista.





Fig 16: Imatge utilitzada com a referència per fer la simulació [7]

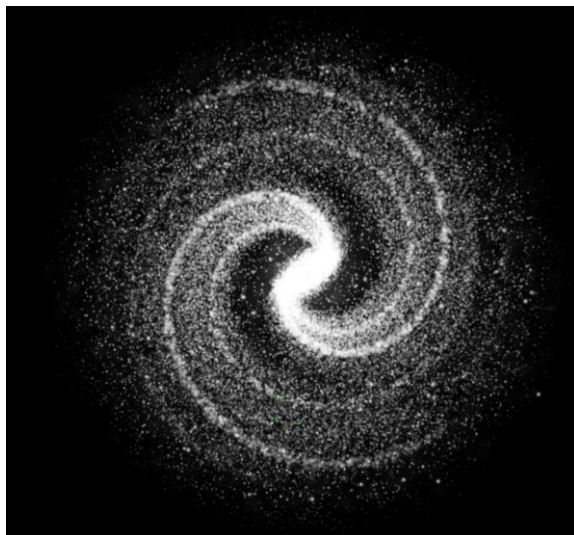


Fig 17: resultat actual de la simulació

## 4 DESENVOLUPAMENT FORAT NEGRE

En aquesta part es farà la simulació d'un forat negre estàtic (sense rotació) i amb un disc d'acreció.

### 4.1 Què es un forat negre?

Un forat negre és un cos celeste que conté una massa suficientment gran com per crear un camp gravitatori tal que ni la llum pot escapar.

#### Parts d'un forat negre

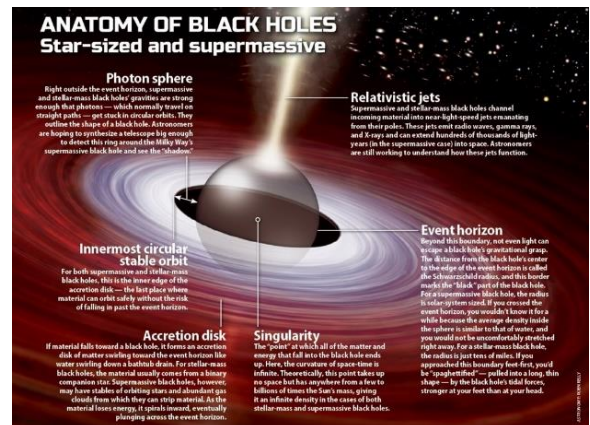


Fig 18: Parts d'un forat negre segons un article de la Astronomy Magazine [8].

De la figura 18 ens centrem en:

- **El disc d'acreció:** Matèria que orbita al voltant del forat negre esperant a ser empassada.
- **L'horitzó de events:** Punt a partir del qual la llum ja no pot escapar. Es correspon amb l'esfera negra que conforma el forat negre.

La gravetat tan intensa provoca certs fenòmens impossibles de concebre per la física Newtoniana. Entre aquests fenòmens es troba la deformació de l'espai temps i la curvatura de trajectòria de la llum, o **Gravity Lensing**.

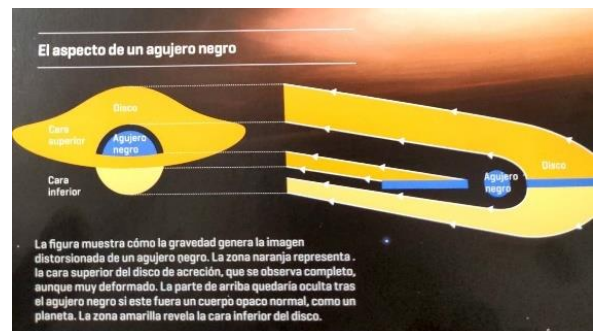


Fig 19: Imatge del llibre Los Agujeros Negros – Atlas del Cosmos [9].

A la figura 19 podem veure com es produeix la curvatura dels rajos de llum. A la figura 20 podem identificar les parts d'un forat negre que hem comentat abans amb un aspecte més realista, afectat pel gravity lensing.

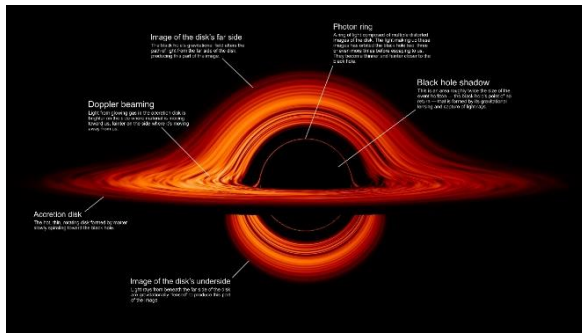


Fig 20: Imatge parts d'un forat negre segons la NASA [10]

Parts del Forat Negre que s'inclouran a la simulació:

- Es representarà el gravity lensing (parametritzable).
- El forat negre comptarà amb un disc d'acreció (de tamany parametritzable).
- S'inclouran els fluxos relativistes.
- El forat negre comptarà amb un anell de fotons.

## 4.2 Gravity Lensing

Per desenvolupar el gravity lensing s'ha agafat com a punt de partida un projecte de Union Assets aparentment abandonat a mitges anomenat "The effect of the gravitational lens"[11].

En aquest projecte s'adapten les equacions de Einstein a un Fragment shader de tipus postproducció, es a dir, que treballa sobre la imatge final de cada fotograma.

I seguint els passos del projecte arribem a la següent equació resultant:

$$deformation = \frac{2 * Rad}{(Dpix * \sqrt{Dist})^2}$$

On els paràmetres signifiquen:

- deformation: Deformació a aplicar a cada píxel.
- Rad: Radi del forat negre.
- Dpix: Distància del píxel al centre del forat negre a nivell de càmera, valor entre 0 i  $\sqrt{2}$  (distància entre una cantonada i la oposada), figura 21.

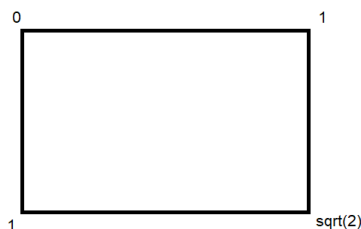


Fig 21: Dpix

- Dist: Distància de la càmera al forat negre.

De l'equació es pot extreure que la deformació depèn de la distància. La deformació a la pantalla creix de forma lineal a mesura que es redueix la distància. La diferència és que quan ens apropem a un objecte quotidià, per exemple una pilota, aquesta creix de forma quadràtica. En realitat, el tamany de la deformació d'un forat negre creix amb la distància. A la figura 22 es mostra una pilota de tennis vs lent gravitacional d'un forat negre:

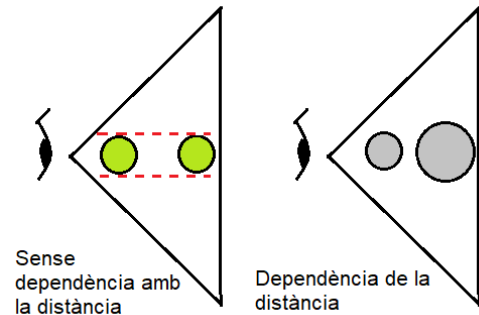


Fig 22: Dependència de la distància

La dependència amb la distància es un tema bastant confús i la simulació no es comporta be quan ens apropem molt o ens allunyem molt. Per aquestes raons s'ha decidit simplificar la dependència de la distància i tractar l'objecte com un objecte quotidià sense dependència, com podria ser la pilota de tennis. Per tant, la equació final queda com:

$$deformation = \frac{DeformFactor * Rad}{(Dpix * Dist)^2}$$

També s'ha afegit el paràmetre *DeformFactor* per poder modificar a voluntat l'escala de la deformació.

L'horitzó d'events del forat negre es pinta a nivell de shader, i se li afegeix un anell de fotons mes gran o més petit en funció del paràmetre *DeformFactor*.

Arribat a aquest punt (figura 23) ja tenim el forat negre i la lent gravitacional, però ens falta com tractar la interacció amb altres elements de l'escena, com el disc d'acreció.

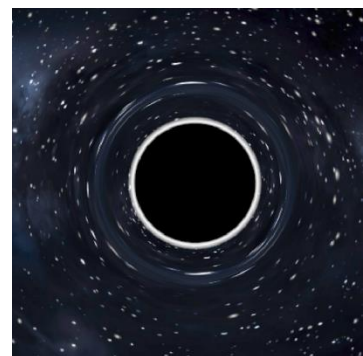


Fig 23: Resultat gravity lensing

### 4.3 Disc d'acreció

Ara mateix la deformació s'aplicarà a tots els elements de l'escena, però nosaltres volem que només s'apliqui als que estan darrere del forat negre.

La solució en la que s'ha pensat consisteix en dues càmeres superposades. La primera de tipus *depth only* (només tracta els elements de la geometria sense captar el fons) amb el "far" de la càmera al forat negre. La segona, una càmera normal, amb el "near" al forat negre, i que capta tots els elements de darrere i el fons. A aquesta se li aplicarà el shader.

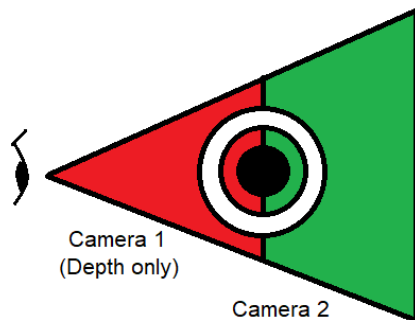


Fig 24: Dues càmeres superposades

El disc d'acreció s'ha fet amb un sistema de partícules semblant al que es va fer per la galàxia.

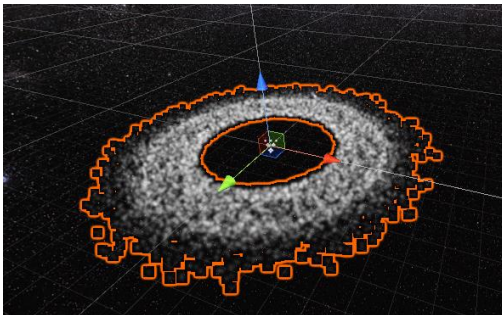


Fig 25: Sistema de partícules disc d'acreció.

El problema en aquest cas era que les imatges de les dues càmeres, amb una deformada i l'altre no, no encaixaven. Això s'ha solucionat creant dues versions del disc superposades però de forma que cada càmera només pot veure una de les dues. A la versió de la càmera 1 se li aplica una compensació als valors de radi intern i extern per encaixar amb la versió de la càmera 2. Compensacions:

$$Radi\ intern = Radi\ intern * (1 + \frac{Rad * DeformFactor}{(Radi\ intern)^2})$$

$$Radi\ extern = Radi\ extern * (1 + \frac{Rad * DeformFactor}{(Radi\ extern)^2})$$

Aquestes equacions s'apliquen directament a la creació del sistema de partícules.

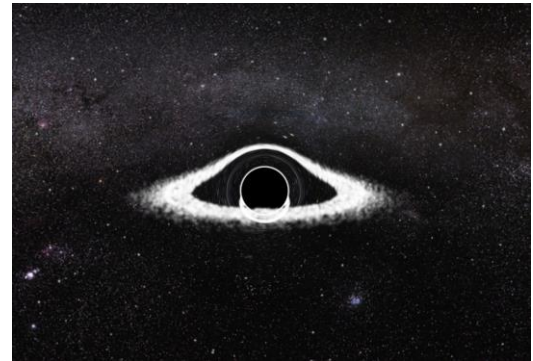


Fig 26: Resultat disc d'acreció.

### 4.4 Fluxos de relativistes

S'han implementat amb dos sistemes de partícules simples simètrics que disparen les partícules en forma de con.

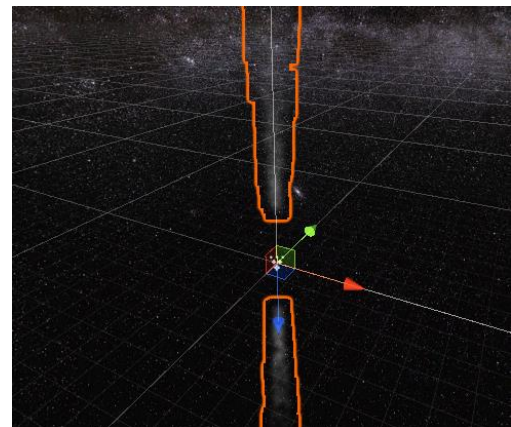


Fig 27: Sistemes de partícules fluxos relativistes.

## 5 PORT A REALITAT VIRTUAL

Per a aquesta part es disposa de l'equipament de realitat virtual HTC vive (figura 28)[12] i el plugin SteamVR de Unity.



Fig 28: HTC Vive



## 5.1 Camp de visió (FOV)

En primer lloc, per fer la implementació en Realitat Virtual s'ha d'adaptar el shader de Gravity lensing per a que funcioni amb qualsevol camb de visió. Fins a arribar aquest punt l'aplicació s'ha desenvolupat amb un camp de visió de 60°, però les ulleres de realitat virtual treballen amb un FOV de 110°.



Fig 29: Comparació del FOV

A la figura 29 veiem que quan el FOV augmenta els objectes es veuen més petits i més lluny (per exemple el vaixell).

Degut a que el forat negre i la lent gravitacional són objectes que es generen al shader de postproducció no es veuen afectats pels canvis de FOV de la càmera. En canvi, la resta d'objectes de l'escena sí que es veuen afectats. Això provoca un seguit de problemes visuals que s'han de solucionar. Per fer-ho, s'ha hagut d'aplicar una compensació matemàtica al radi del forat negre i al radi de la lent gravitacional, al codi del shader.

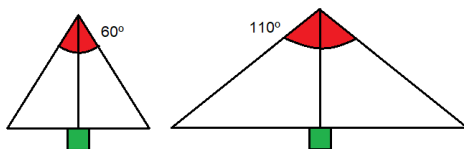


Fig 30: Variació del FOV

Raonant a partir de la figura 30 i fent proves s'ha arribat a la següent equació compensatòria:

$$\text{CompensacióFOV} = \sqrt{3} * \tan(\text{FOV}/2)$$

Que s'aplica com:

$$\text{RadiCompensat} = \frac{\text{RadiForatNegre}}{\text{CompensacióFOV}}$$

Aquesta compensació s'aplica sobre el radi del forat negre a l'hora de crear la lent gravitacional, al shader.

## 5.2 Distorsió del FOV

A una imatge amb FOV elevat, tal com es mostra a la figura 31, els objectes de la perifèria es veuen distorsionats (allargats i ampliats).

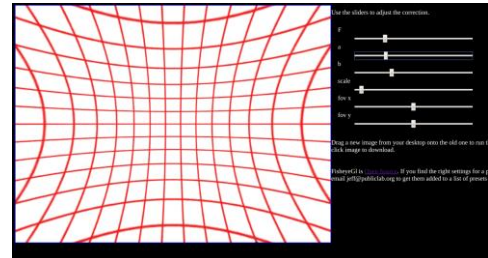


Fig 31: Distorsió del FOV de FisheyeGL

Els objectes generats pel shader de postproducció no es veuen afectats per aquesta distorsió, i si volem una visió realista en realitat virtual hem d'aplicar aquesta distorsió al forat negre i a la lent gravitacional. Si generem una esfera i la situem a la perifèria de la imatge, Veiem una el·lipse que apunta cap al centre de la imatge.



Fig 32: Esfera a la perifèria del FOV

La solució que s'ha implementat implica generar el forat negre com una el·lipse amb radi i angle dinàmics segons on es troba el píxel a la imatge. Fent moltes proves s'ha arribat a aquestes equacions amb resultat satisfactori:

$$\text{EixCurt} = \frac{\text{RadiCompensat}}{\cos(\text{pixelAngle})}$$

$$\text{EixLlarg} = \frac{\text{RadiCompensat}}{\cos(\text{pixelAngle}) * \cos(\text{camAngle})}$$

On:

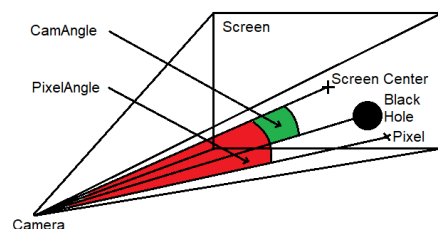


Fig 33: Angles de la camera

Per evitar problemes visuals s'aplica la següent condició: Si  $pixelAngle < camAngle$ ;  $pixelAngle = camAngle$ .

### Equació de l'el·lipse:

$RadiFinal =$

$$\frac{EixLlarg * EixCurt}{\sqrt{(EixLlarg * \sin(vectorAngles))^2 + (EixCurt * \cos(vectorAngles))^2}}$$

On:

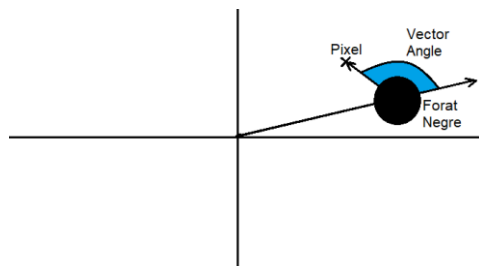


Fig 34: Vector angles

Aquesta equació genera una el·lipse que apunta cap a la vora de la imatge tal com es mostrava a la figura 32.

## 5.3 UI en Realitat Virtual

S'ha decidit enllaçar la user interface al controlador del sistema HTC Vive, el resultat es mostra a la figura 35.

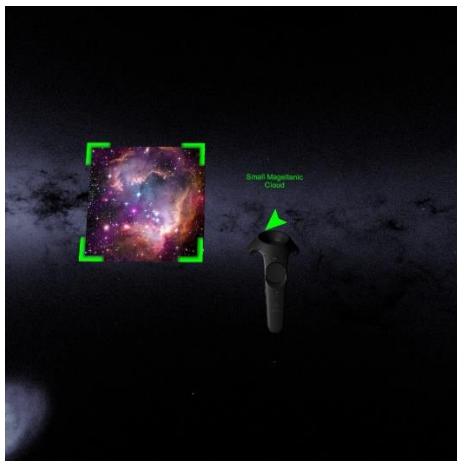


Fig 35: UI al controlador

## 5.4 Control d'inputs en Realitat Virtual

Fins ara els inputs de l'usuari es captaven mitjançant el teclat, però en aquesta secció canviarem els events de teclat per events del hardware HTC Vive.

En primer lloc hem de generar el fitxer actions.json amb les accions que volem captar del hardware. El plugin SteamVR ens aporta una interfície gràfica per definir aquestes accions (figura 36).



Fig 36: Interfície per definir accions

Un cop definides les accions a aquesta interfície, captem l'estat d'aquestes de la mateixa manera que captàvem events de teclat.

## 6 CONTROLS D'ÚS

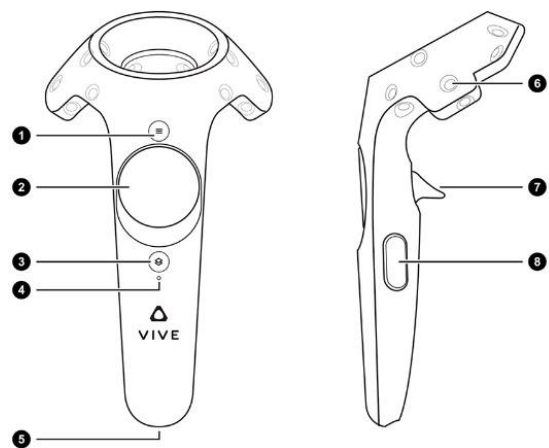


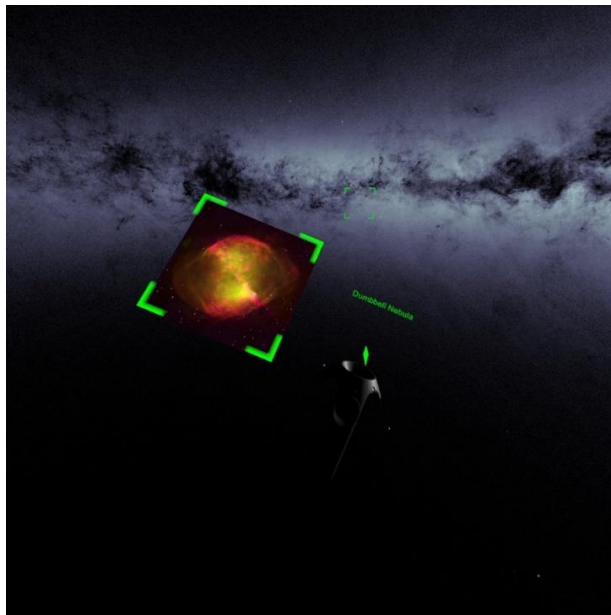
Fig 37: Controlador Vive

- Botó 1 (figura 37): Amagar o mostrar interfície d'usuari.
- Botó 2 (figura 37): Dreta/Esquerra: Seleccionar les diferents opcions dels menús.
- Botó 2 (figura 37): Amunt/Avall: Canviar els paràmetres d'una opció del simulador.
- Botó 3 (figura 37): Menú SteamVR.
- Botó 7 (figura 37): Tecla Enter.

## 7 RESULTATS

A la figura 38 es mostra la pantalla inicial amb el Skybox. Les figures 39 i 40 mostren diferents vistes de la galàxia. La figura 40 concretament mostra el punt on es troba el sistema solar a la galàxia. Les figures 41 i 42 mostren diferents angles de la escena del forat

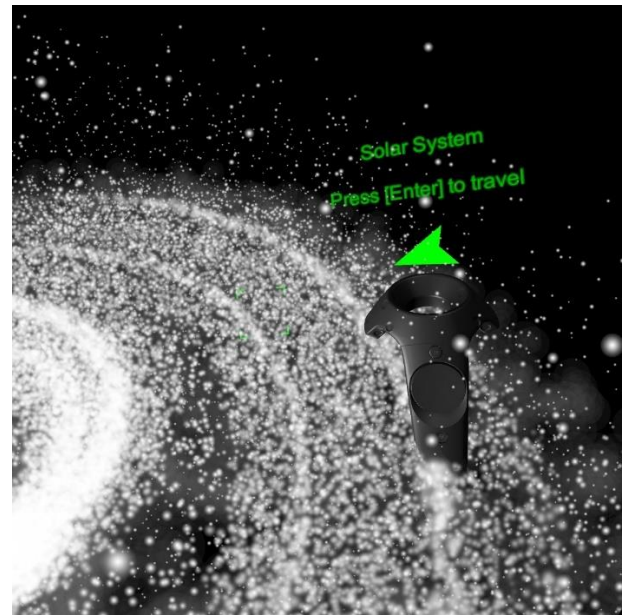
negre, i la figura 43 mostra el forat negre amb alguns paràmetres modificats.



*Fig 38: Pantalla skybox*



*Fig 39: Galàxia*



*Fig 40: Close-Up galàxia*



*Fig 41: Forat Negre*



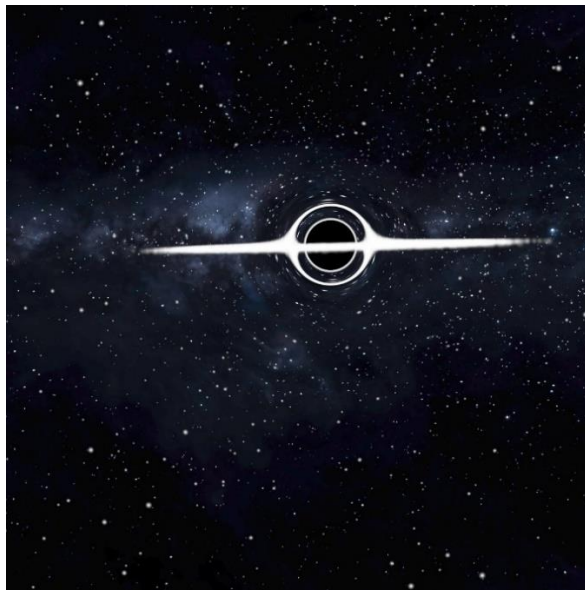


Fig 42: Perfil Forat Negre.

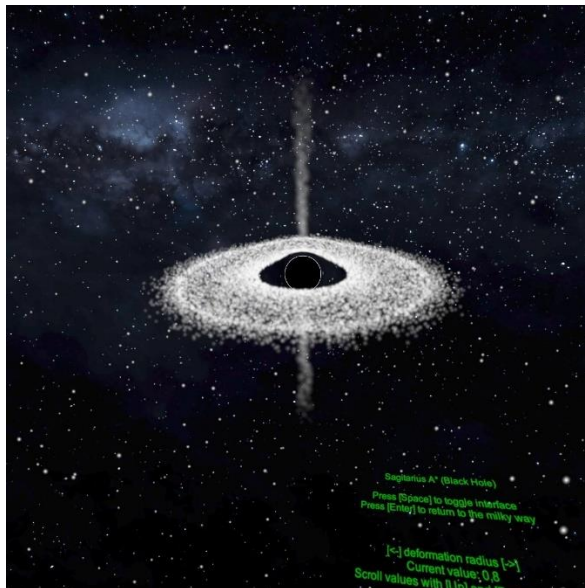


Fig 43: Paràmetres alterats

## 8 CONCLUSIONS I MILLORES

S'ha dissenyat i implementat el simulador tal com es definia a la introducció i als objectius.

El simulador s'ha exportat a Realitat Virtual per donar una experiència més immersiva. El simulador disposa de tres escenes:

- La primera mostra una vista Skybox de la via làctia amb una imatge proporcionada pel PIC.
- La segona mostra una vista 3D d'una galàxia feta amb sistemes de partícules.

- La tercera mostra un forat negre realista amb un gravity lensing tractat amb un fragment shader.

S'han trobat diverses limitacions amb els sistemes de partícules, entre les quals el tema del color, no s'han aconseguit fer gradients de color realistes.

La major dificultat del projecte ha sigut haver de treballar amb el fragment shader per fer la part del gravity lensing, especialment la part d'aplicar la distorsió i les compensacions al camp de visió.

Aquest projecte és una demo i s'hi podrien afegir moltes coses més, com per exemple noves galàxies o la possibilitat de visualitzar nebuloses en 3D.

També s'explorà la possibilitat de crear i posar a la venda un asset de forats negres a la Unity Store.

## 9 AGRAÏMENTS

M'agradaria agrair al meu tutor Enric Martí per confiar amb mi amb un projecte tan complex i poc comú. També agrair-li que m'hagi deixat tot l'equipament de Realitat Virtual durant dos mesos per poder treballar pel meu compte en el projecte.

També agrair al Jorge Carretero i al PIC de la UAB la possibilitat de treballar amb ells i de disposar del seu feedback. Agrair també el privilegi de disposar de les imatges del PIC de la via làctia, unes imatges punteres al mon.

## 10 BIBLIOGRAFIA

- [1] Motor de videojocs Unity (<https://unity.com/es>) - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [2] 100000 Stars - <http://stars.chromeexperiments.com/> - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [3] Spaceengine - <http://spaceengine.org/> - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [4] Interstellar (2014), Christopher Nolan (Pel·lícula)
- [5] Textura de la Milky Way - <https://www.solarsystemscope.com/texture/s/> - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [6] Parts de la Milky Way - [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2016/09/Anatomy\\_of\\_the\\_Milky\\_Way](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/09/Anatomy_of_the_Milky_Way) - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [7] Imatge de la Milky Way - <https://solarsystem.nasa.gov/resources/28>



- 5/the-milky-way-galaxy/* - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [8] Imatge parts d'un forat negre - *<https://astronomy.com/magazine/2019/08/a-brief-history-of-black-holes>* - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [9] Llibre 'Los Agujeros Negros – Atlas del Cosmos' de National Geographic.
- [10] Imatge parts d'un forat negre amb Lensing - *<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-visualization-shows-a-black-hole-s-warped-world>* - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [11] The effect of the gravitational lens - *<https://unionassets.com/blog/the-effect-of-the-gravitational-lens-195>* - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [12] HTC Vive - *<https://www.vive.com/eu/>* - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [13] Comparació del FOV - *[https://www.youtube.com/watch?v=H7emOKBA7\\_k](https://www.youtube.com/watch?v=H7emOKBA7_k)* - data del darrer accés, Febrer 2021.
- [14] Pixabay music - *<https://pixabay.com/es/music/>* - data del darrer accés, Febrer 2021.